

RIビームラインと 生成ターゲット

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

吉田光一

OHO '23

内容

- はじめに
- RIビームの生成、分離、収集
 - RIビームの生成
 - RIビームの収集、分離
 - RIビームの同定
- RIビーム用生成ターゲット
 - RIビーム生成用ターゲットの特徴
 - RIBFのRIビーム生成ターゲット
- まとめ

はじめに

- 原子核とは、
陽子と中性子が核力で結びついた集合体
陽子数、中性子数の組み合わせで、
性質決まる。

約7,000個存在する。

安定核 (寿命 ∞) 251個
(寿命 > 46億年) 35個

それ以外、
有限の寿命で、放射線を出して崩壊

不安定核、Radio Isotope RI

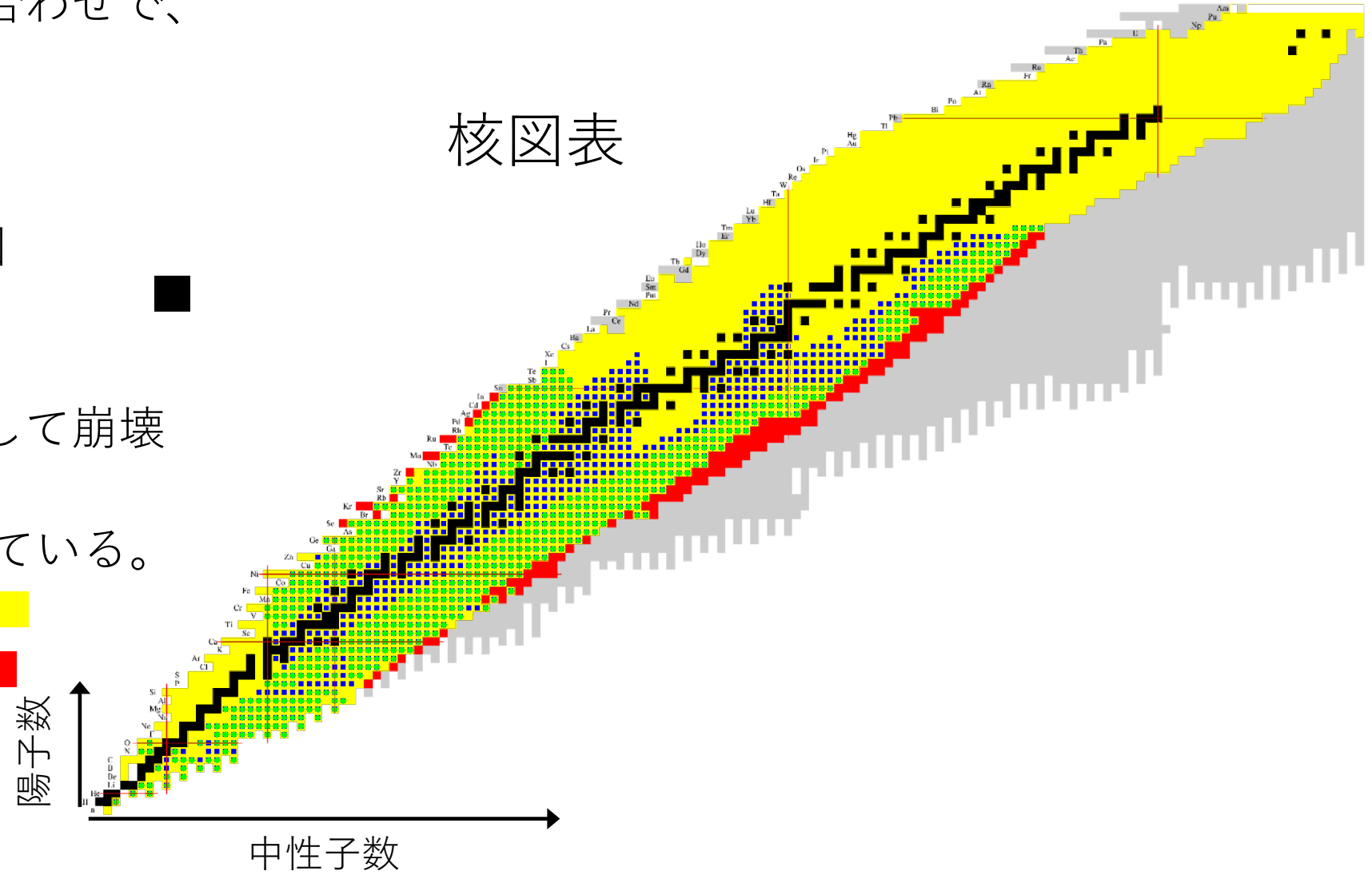
これまで約3300個見つかっている。

既知のRI

BigRIPSで発見したRI
(157個)

- 安定核の核反応で生成

核図表

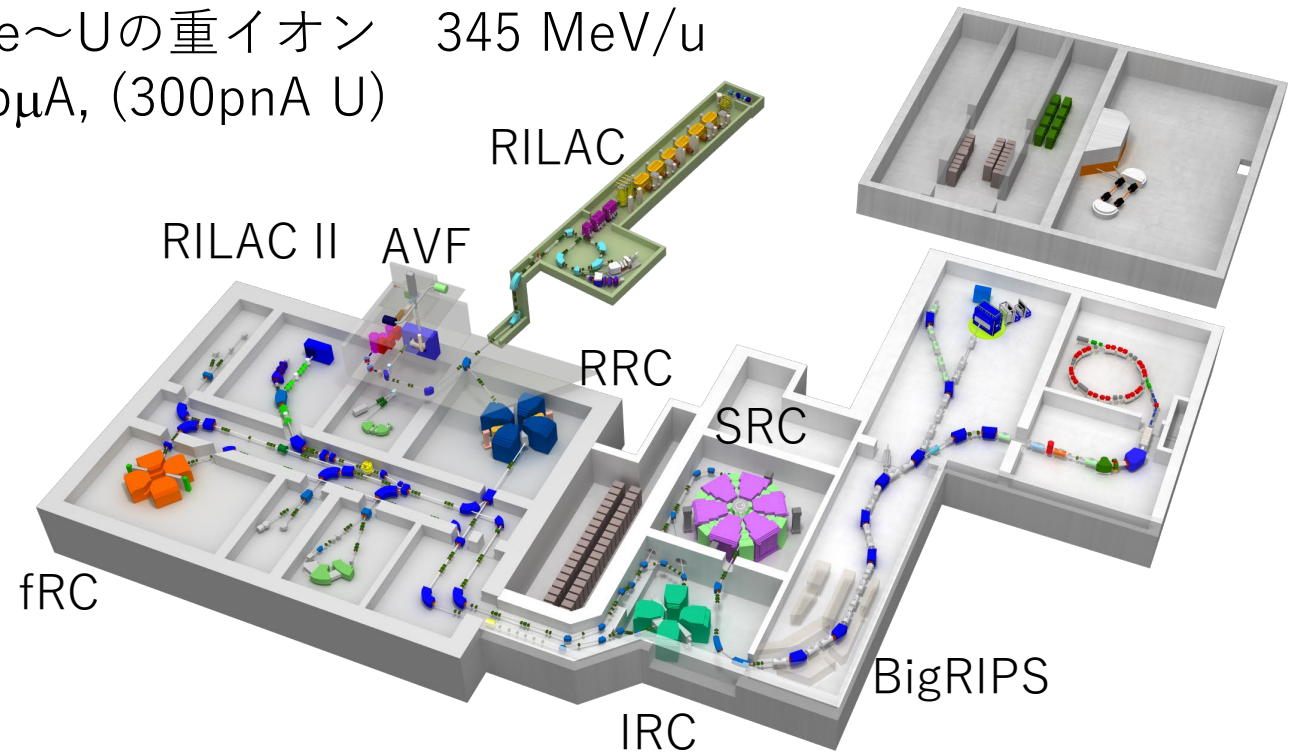


RIビーム

- RIビームとは、RI（不安定核）をビームとしたもの。
 - RIを加速器で加速、RIビームとする。
 - 加速器で加速された安定核ビームから核反応によりRIを生成、これを収集、分離してビームとする。
- 理化学研究所RIKEN RIビームファクトリー（RIBF）
後者のRIビームライン：超伝導RIビーム生成装置 BigRIPS



He~Uの重イオン 345 MeV/u
1pμA, (300pnA U)



超伝導RIビーム分離生成装置BigRIPS

- ▶ 大アクセプタンス
 - ウランの飛行核分裂片の広がり (RIBFエネルギーで ± 50 mr, $\pm 5\%$) をほぼカバー
- ▶ 超伝導を使った大口径の四重極電磁石
 - ポールチップ径= 17 cm, ポールチップ磁場 = 2.4—2.5 T
- ▶ 2段構成のセパレータ
- ▶ 第2ステージの分解能が高い
 - 全運動エネルギーを測定しなくても、粒子識別可能



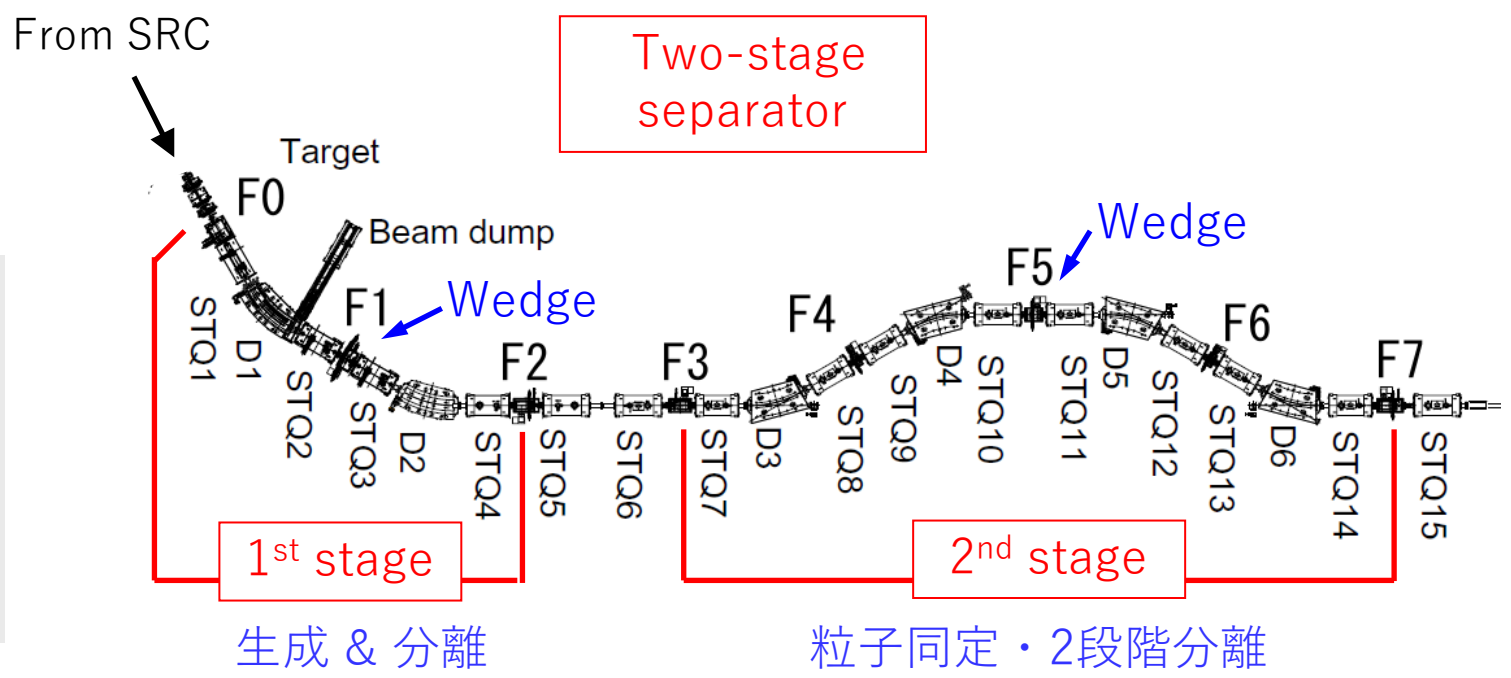
第1ステージ



第2ステージ

Parameters:
 $\Delta\theta = \pm 40$ mr
 $\Delta\phi = \pm 50$ mr
 $\Delta p/p = \pm 3\%$
 $B\rho = 9$ Tm
 $L = 78.2$ m

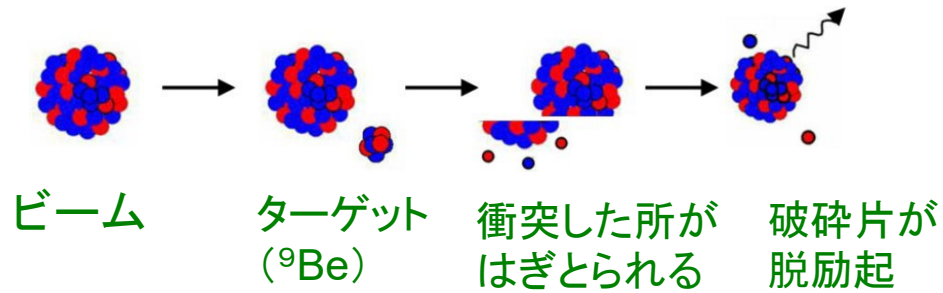
STQ1—14:
 Superconducting Q triplets
 D1—D6:
 Dipoles (30 deg.)
 F1—F7: Focuses



RIビームの生成

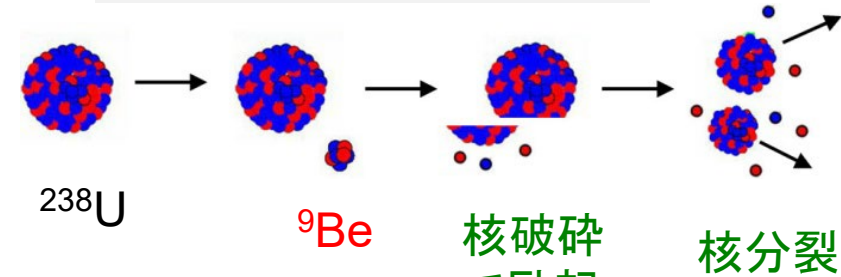
100MeV/uを超える重イオンビーム原子核がターゲット原子核と核反応を起こしてRIが生成。

入射核破碎反応

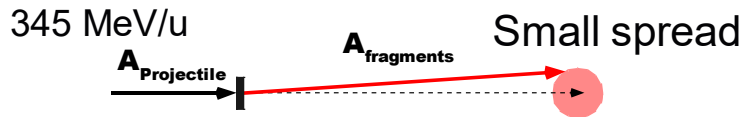
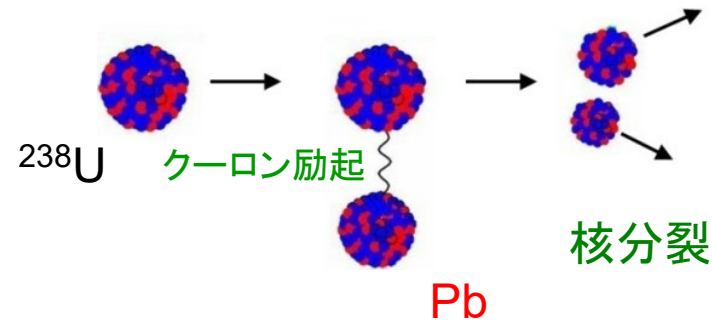


ビーム原子核よりも小さい、多種多様なRIが破碎片として生成

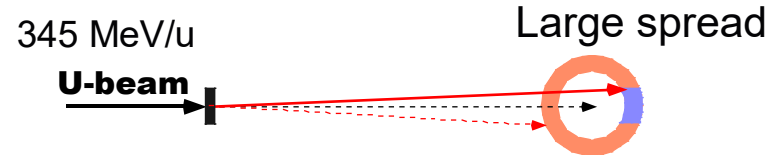
²³⁸Uの飛行核分裂



核分裂片としてRIが生成



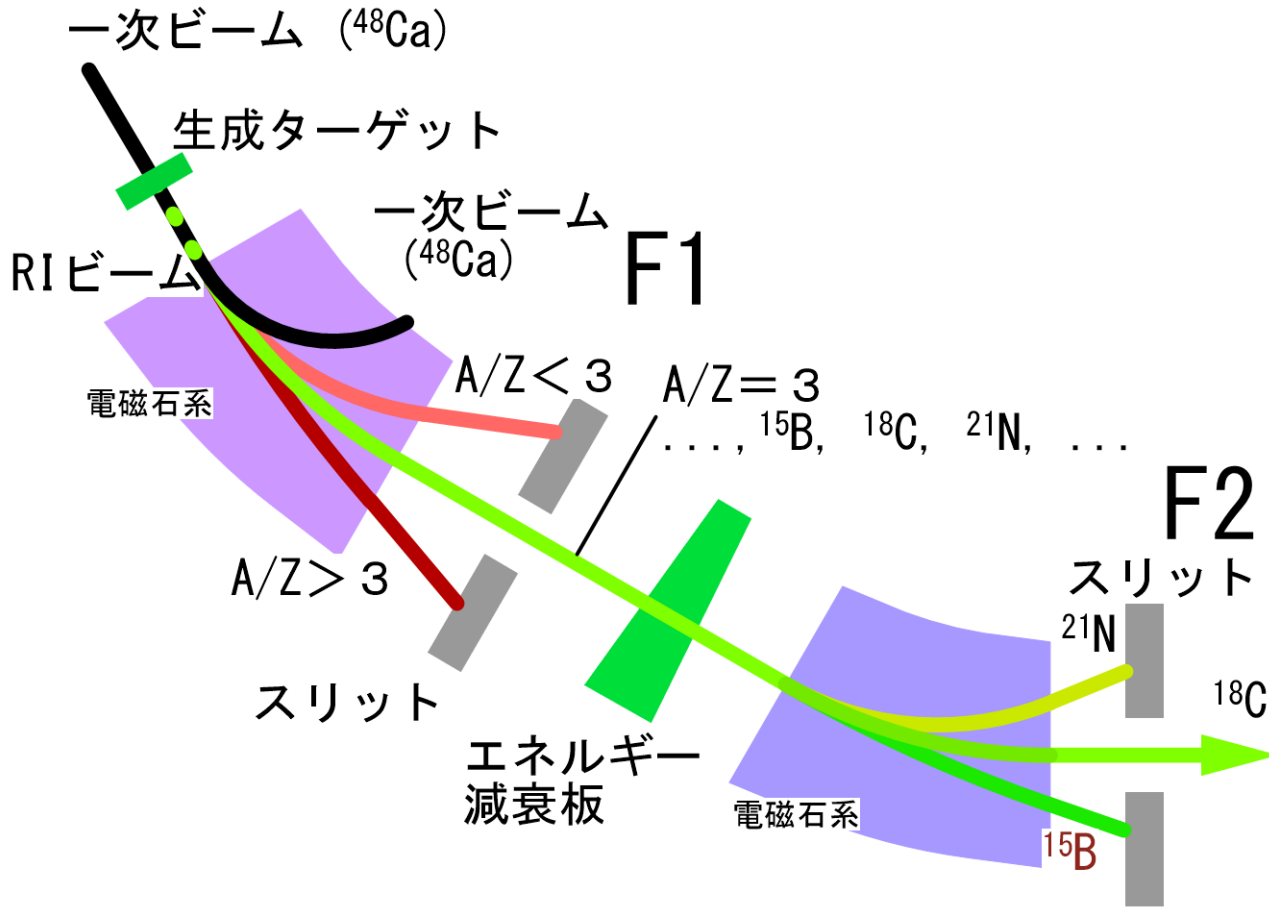
角度： ~10 mr
運動量： ~1 %



~100 mr
~10 %

入射ビームの運動量が大きい（重イオン、高エネルギー）ので、破碎片/核分裂片はビーム速度とほぼ同じ速度で前方に集中する。→ ビームとして利用できる。

RIビームの分離



^{48}Ca ビームから ^{18}C を作る

- ターゲット
 - 入射核破砕反応により ^{48}Ca より軽いRIが生成。
 - 生成したRIの速度 V は、ビームの速度とほぼ同じ。
- STQ1-D1-STQ2で磁気剛性を分析、F1へ

磁気剛性 = $\frac{\text{運動量}}{Z} = \frac{Am_u\gamma\beta c}{Z} \propto \frac{A}{Z}$ なので

 - D1で反応しなかった安定核ビームを磁気剛性の違いで分離し、ビームダンプで止める。
 - F1では、RIが A/Z によって分離する。
- $A/Z=3$ のRI (^{15}B , ^{18}C , ^{21}N など) はスリットを通過しエネルギー減衰板に入る。

荷電粒子のエネルギー損失(Bethe-Blochの式)

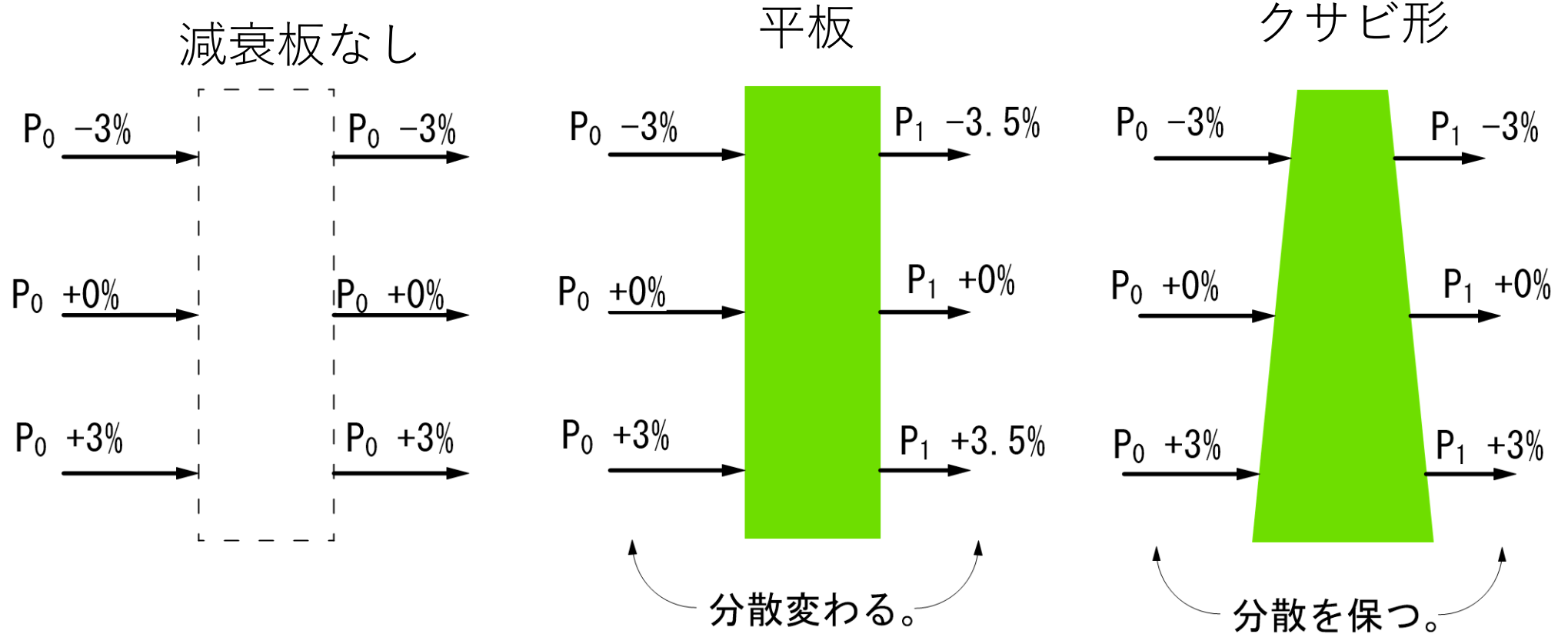
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{nZ^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$
 - RIの Z^2 に比例するエネルギー損失。
 - 通過後、 Z によって異なるエネルギー、磁気剛性になる。
- STQ3-D2-STQ4で再び磁気剛性を分析、F2へ
 - Z の違いによりさらに分離、 ^{18}C が選り出される。

エネルギー減衰板

荷電粒子のエネルギー損失
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{nz^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

粒子のエネルギー（運動量）が小 → エネルギー損失 大
 粒子のエネルギー（運動量）が大 → エネルギー損失 小

F1 分散のある焦点：運動量の違いが位置の違いになる。



分散を保っておくとビームラインの調整が楽。 中心運動量の変化分の B_p スケーリングで済む。

RIビームの同定

▶ RIの同定: TOF- $B\rho$ - ΔE 法

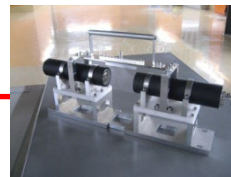
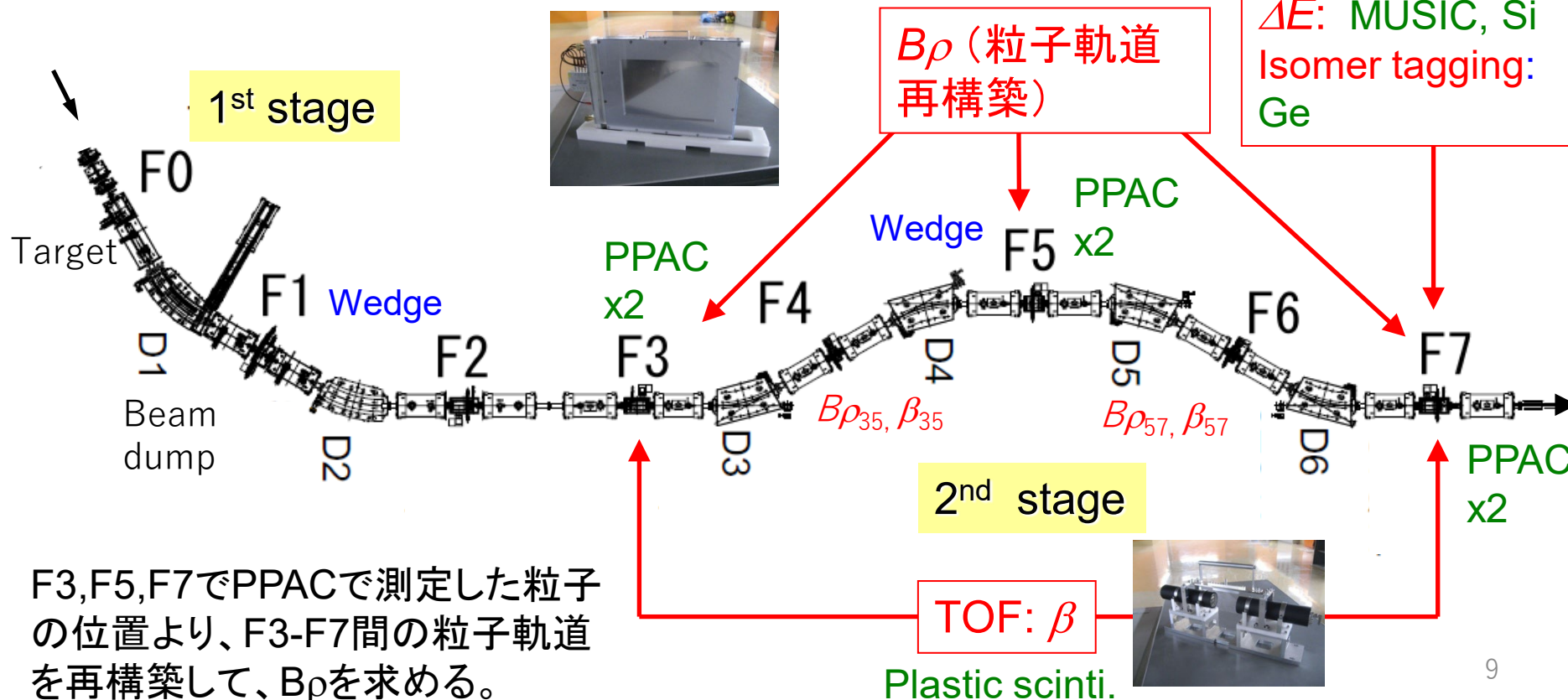
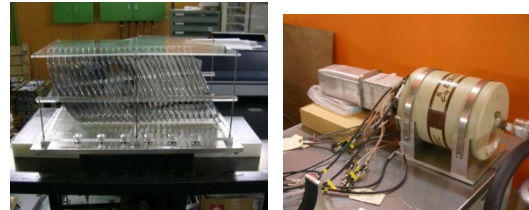
TOF, $B\rho$, $\Delta E \rightarrow Z, A/Q$

TOF: Time of flight
 $B\rho$: Magnetic rigidity
 ΔE : Energy loss

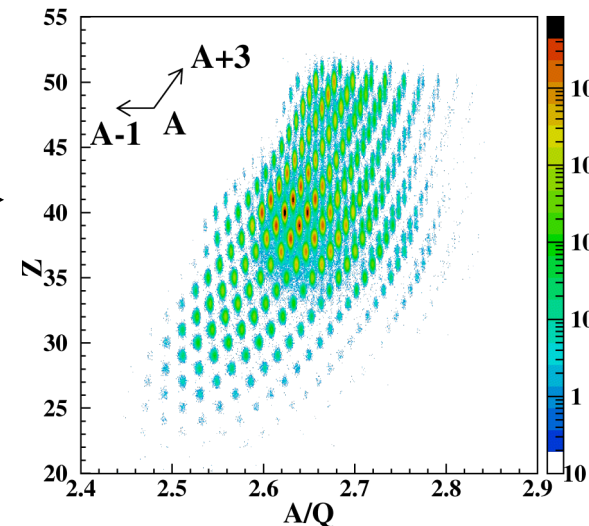
$$\frac{A}{Q} = \frac{B\rho c}{\gamma\beta m_u}$$

$$Z \leftarrow \Delta E = f(Z, \beta)$$

Bethe-Bloch formula



U+Be 2.9 mm
 $B\rho_{01} = 7.990 \text{ Tm}$
 F1 deg Al 2.18mm



RIビーム生成用ターゲットの特徴

- ターゲットの材質
- ターゲットの厚さ
- ターゲット中でのビーム発熱

*ターゲットは真空中に置かれる。(ビームを余計なものに当たらない。)

ターゲットの材質

- 入射核破砕反応用

入射核破砕反応の断面積：ターゲット原子核の種類にほとんどよらない。
→ビームに対する影響（エネルギー損失、多重散乱）を考えると軽い原子核が有利。ベリリウム、炭素が主に使われる。

- ^{238}U の飛行核分裂

- 核破砕一核分裂

核破砕反応と同じく、軽い原子核のターゲット

- クーロン励起一核分裂

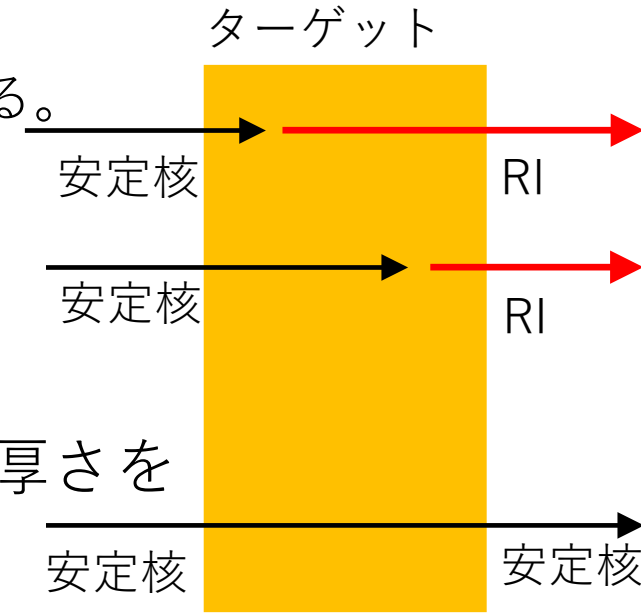
原子核の周りの強いクーロン場を利用するため、陽子数 Z の大きなターゲット

金 $\text{Au}(Z=79)$ 、鉛 $\text{Pb}(Z=82)$ が多いが、RIビーム生成向けにはタングステン $\text{W}(Z=74)$ （高融点）

ベリリウム（もしくは炭素）を主に、 ^{238}U のクーロン励起核分裂向けにタングステンを用意すれば、よい。

生成ターゲットの厚さ

- 厚い方がRIの生成率大きい。
- ターゲット中での反応点の違いでRIのエネルギー広がる。
 - エネルギー損失（安定核ビーム） > エネルギー損失（生成したRI）なので、
ターゲット入ってすぐ反応 RI エネルギー 大
ターゲット出口付近で反応 RI エネルギー 小
 - 反応による運動量の広がりターゲット中の反応点による広がりが加わる。
- 厚いターゲットでは多重散乱によってビーム広がる。
- ターゲット通過後のRIビームの磁気剛性と、未反応安定核ビームの磁気剛性が一致しないようにする。



⇒ 生成に使う安定核ビームと生成するRIビームとの関係で適切な厚さを
選択する必要がある。

- 経験的には安定核ビームの飛程の30-50%を使うことが多い。
 ^{238}U 345MeV/u Be 飛程13mm 4~6 mm厚さ
 ^{48}Ca 345MeV/u Be 飛程52mm 15~30mm厚さ

いろいろな厚さのターゲットをビームタイム途中で切り替えて使う必要がある。

ビームによる発熱量

- RIビームの生成ターゲット

- 大強度 ~ 1 particle μA の重イオンビーム (^{238}U まで) の照射
- ビームサイズ $\phi 1\text{ mm}$
- ビームのエネルギー損失による発熱 18kW

(^{238}U 345 MeV/u, $1\text{p}\mu\text{A}$, ベリリウム4mm厚さ)
 \Rightarrow 熱密度 $5.7\text{kW}/\text{mm}^3$

ベリリウム 密度 $\rho=1.85\text{g}/\text{cm}^3$ 、比熱 $c_p=1.82\text{ W}/\text{Kg}$

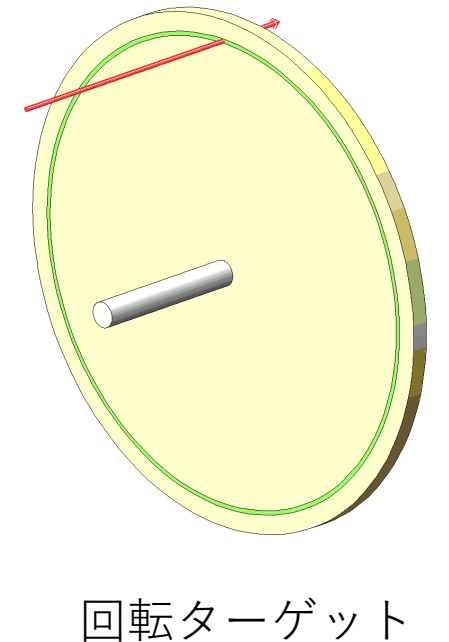
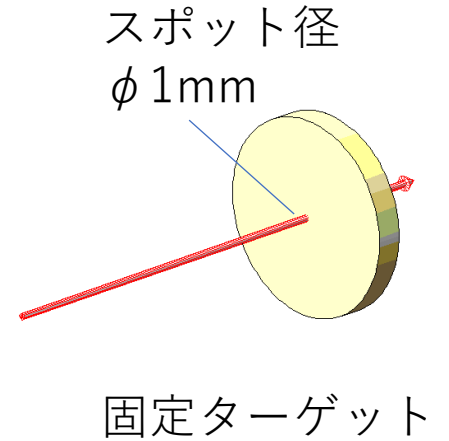
ビームスポットから熱が逃げないとすると、

1ms で 1700°C の温度上昇。(融点 1287°C) \rightarrow 除熱ムリ。

ターゲットを回転させて、熱密度を下げる。

半径150mm程度で回転させると、熱密度を1/1000に下げられる。

回転スピードは熱拡散に比べて十分早くすれば、円周上にほぼ均一に熱を広げられる。



伝導冷却と輻射冷却

熱の移動：伝導、対流、輻射

熱伝導方程式

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q$$

ρ : 密度 c_p : 比熱 λ : 熱伝導率 q : 発熱量

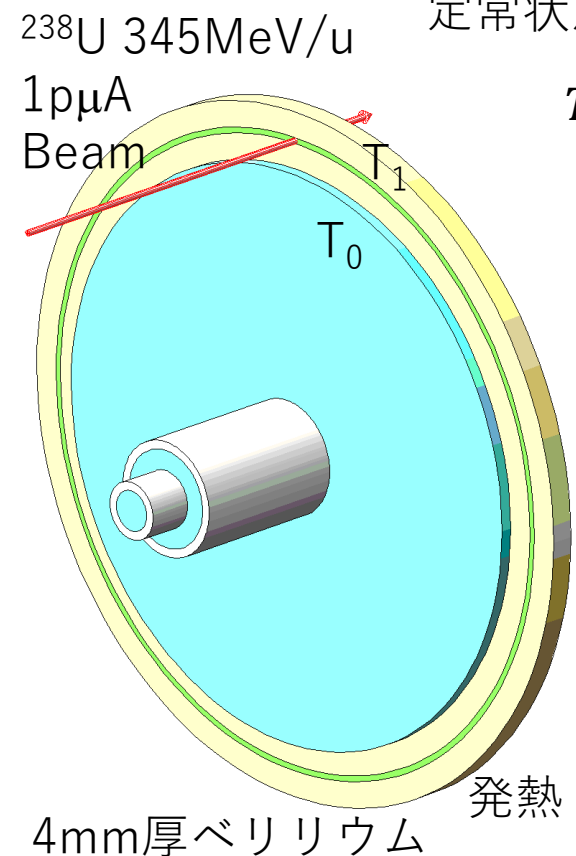
定常状態、円筒座標で解くと、

$$T(r) = T_0 + (T_0 - T_1) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_1/r_0)}$$

$$Q(r) = \frac{2\pi\lambda L(T_0 - T_1)}{\ln(r_1/r_0)}$$

$r_0=120\text{mm}$ 、 $r_1=150\text{mm}$ 、
 $\lambda=200\text{W/m K}$ (ベリリウム)、
 $L=4\text{mm}$ 、 $T_0=20^\circ\text{C}$ 、
 $Q=18\text{kW}$ とすると

$T_1=820^\circ\text{C}$
(ベリリウム融点 1287°C)



熱輻射

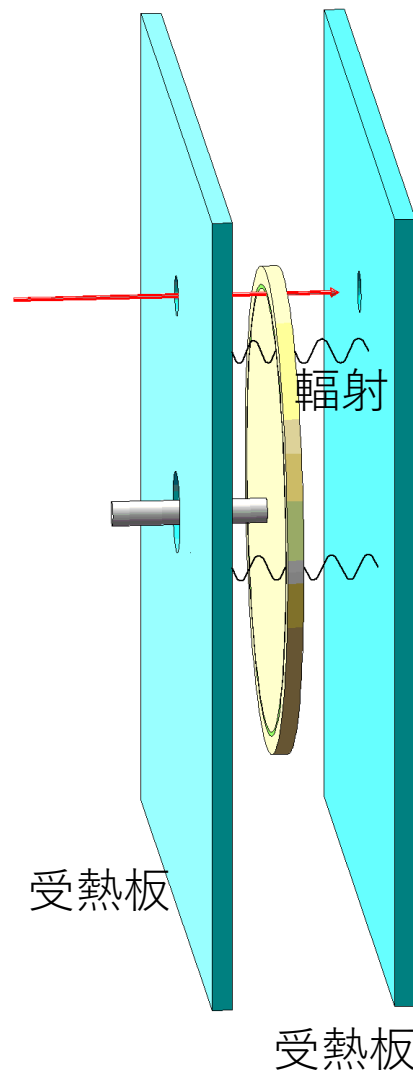
ステファン・ボルツマンの法則

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

ε : 輻射率

σ : ステファン・ボルツマン係数
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ K}^4\text{)}$

T : 絶対温度 (K)



円周状に広げたビームスポット
から18kWの熱を輻射で逃がす。
輻射面積 (ビームスポット面積)

$$S = 2\pi \times 150\text{mm} \times 1\text{mm} \times 2\text{面} \\ = 1885 \text{ mm}^2$$

$\varepsilon=0.8$ (炭素)

$E=18\text{kW}$ をいれると、

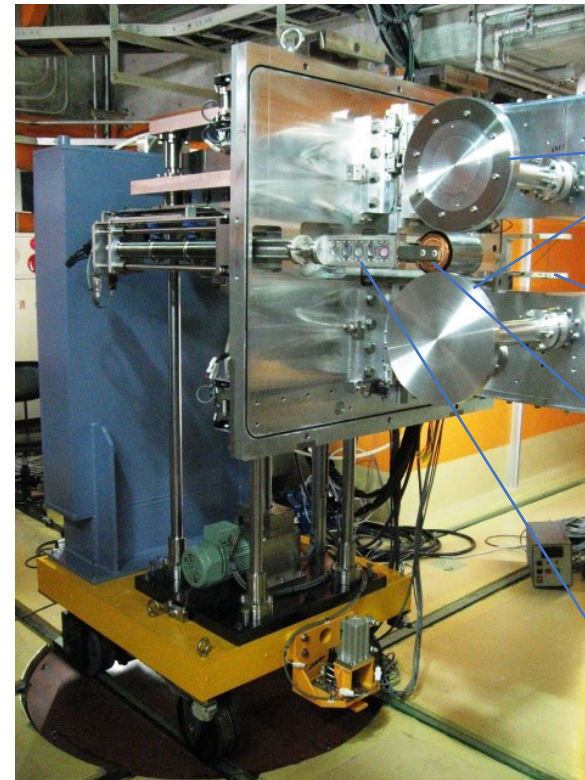
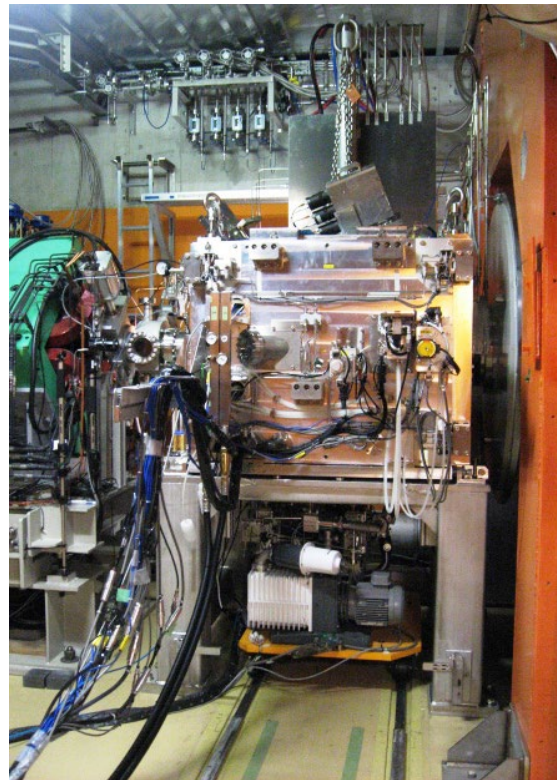
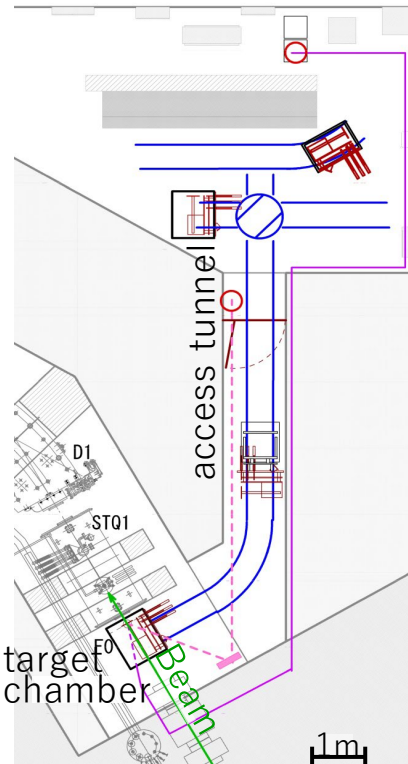
$$T = 3800 \text{ K}$$

(炭素:昇華点 3915 K)

実際には、熱伝導で輻射面積
広がる。2倍になると $T=3200\text{K}$)

BigRIPSの生成ターゲット

- 伝導冷却式の水冷回転円盤ターゲット
- RIBFの ^{12}C - ^{238}U ビーム 345MeVu、 $1\text{p}\mu\text{A}$ に対応（目標）
- RIビーム生成効率の高いベリリウムをターゲットに採用
- 2つの回転ターゲットユニットで最大15種類のターゲット厚さの選択に対応。
- ターゲットチェンバーの側面フランジに主要な機構を搭載。専用台車を使って、容易にビームラインから取り出してメンテナンス可能。



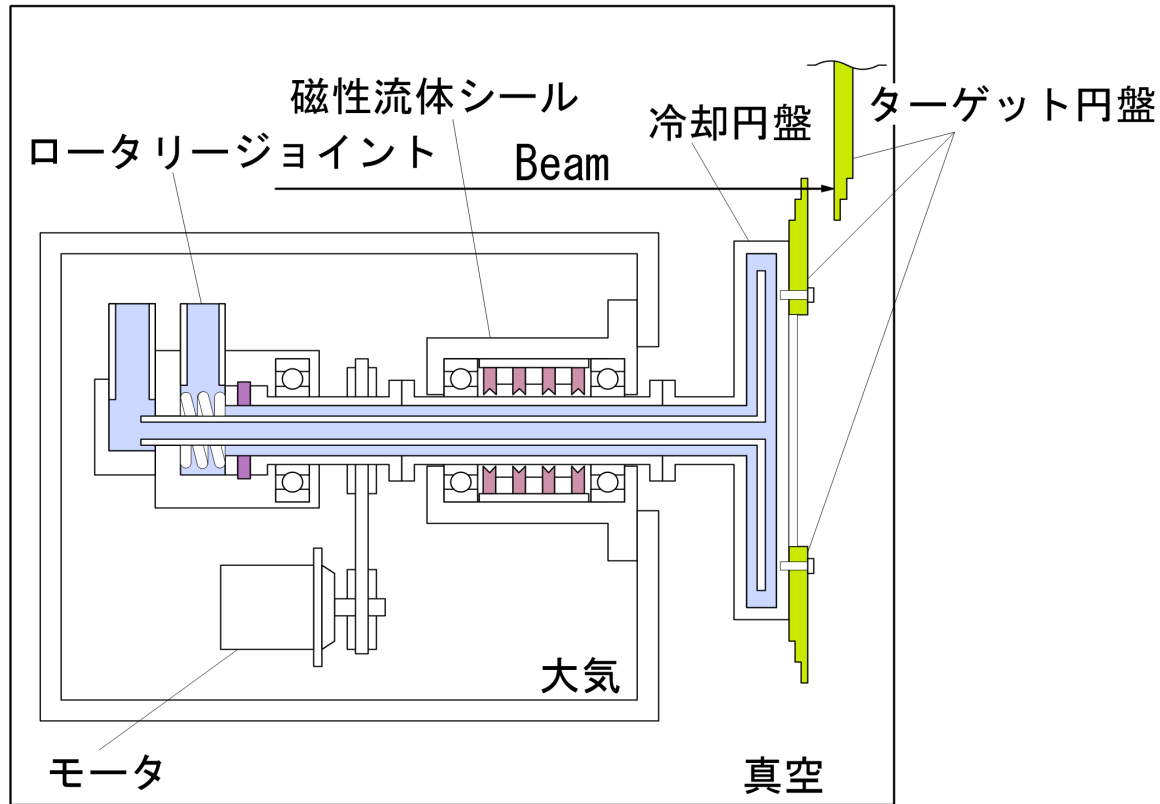
回転ターゲット

プロファイルモニタ

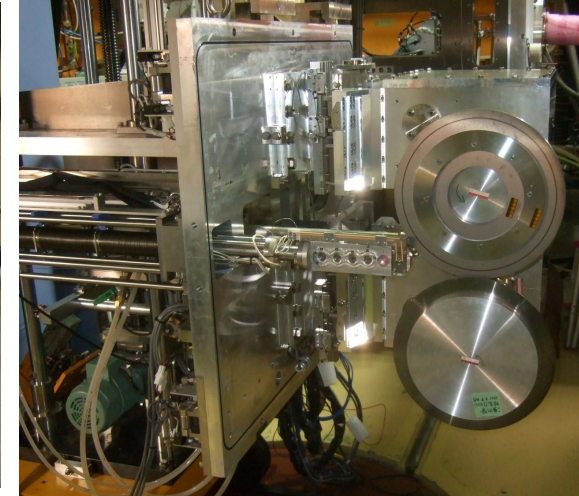
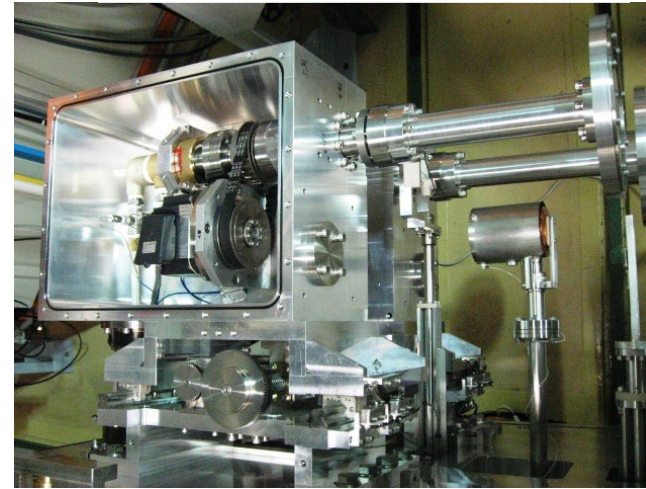
ファラディカップ

ターゲットラダー
(固定式ターゲット)

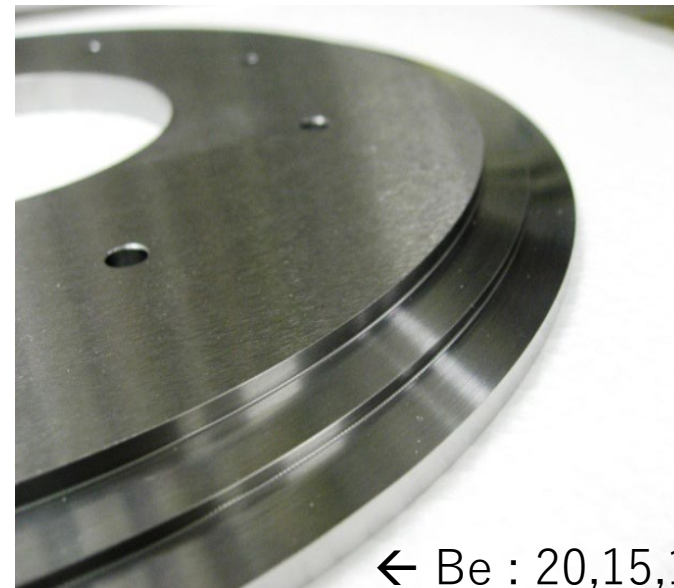
BigRIPS回転ターゲット詳細



回転ターゲットユニット



ターゲット本体



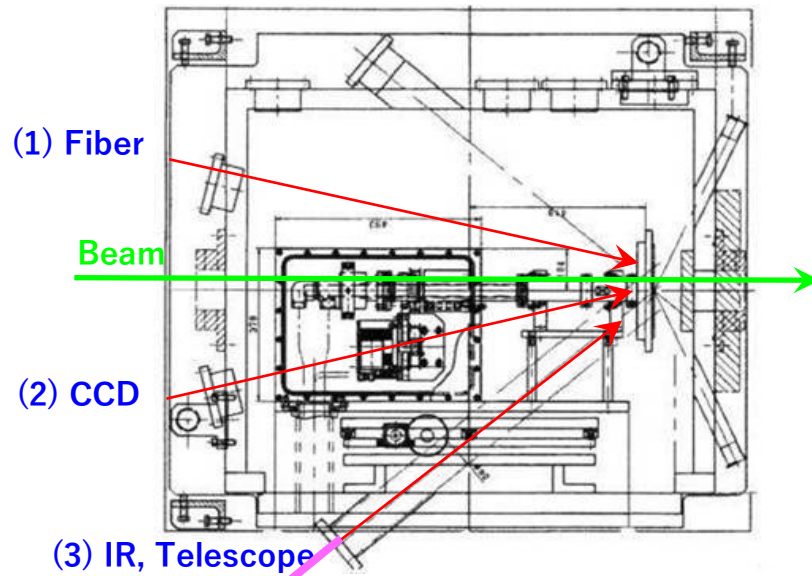
サイズ	φ 30cm
材質	Be, (W)
厚さ	10-15-20 mm 5-7-10 mm 2-3-4 mm

← Be : 20,15,10 mm thick

- ロータリージョイント
回転軸への冷却水導入。回転軸に炭素板をばねで押し付けて水をシール。(真空はもたない。)
- モーター
IPMモーター、センサレスで回転数制御 100-1000rpm
- 磁性流体シール
回転軸の真空シール、軸周りの磁性流体で真空シール。

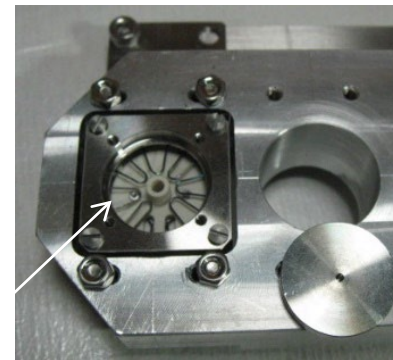
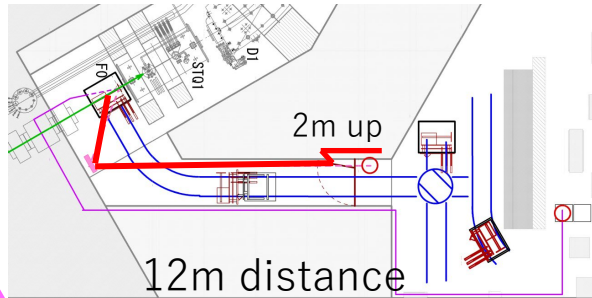
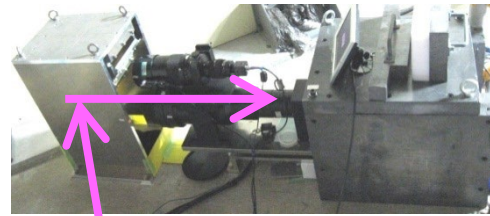
ターゲット温度測定機構

Target chamber (upper view)

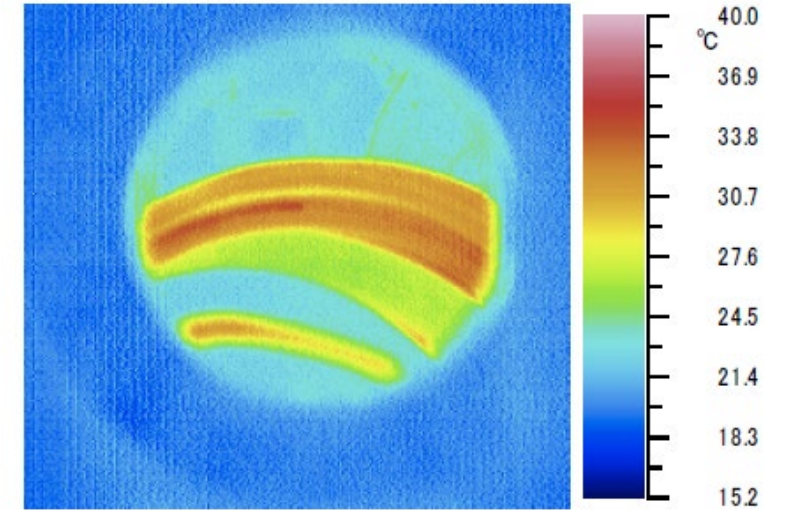


サファイアガラス窓

赤外線カメラ
AVIO TVS-8500
(放射線に弱い。短時間
使用。)



Be 15mm, 48Ca 420pA, 100rpm
1.3kW heat -> Beam spot 84°C



Rotating target

温度の校正：
輻射率、光路の減衰を補正

ヒーター、ベリリウム板、
熱電対をターゲットラダーに
マウントし温度校正

ANSYSによる回転ターゲットの除熱計算

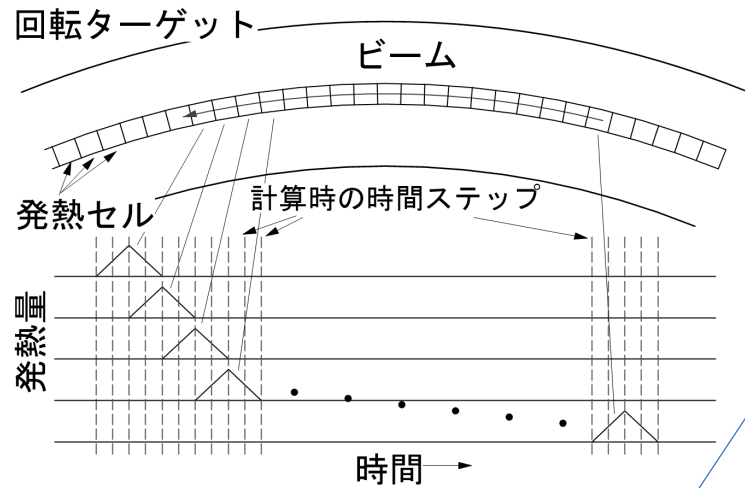
回転ターゲットの詳細構造を取り込んだ伝熱計算：ANSYS WorkBench Mechanical

回転運動のモデル化：

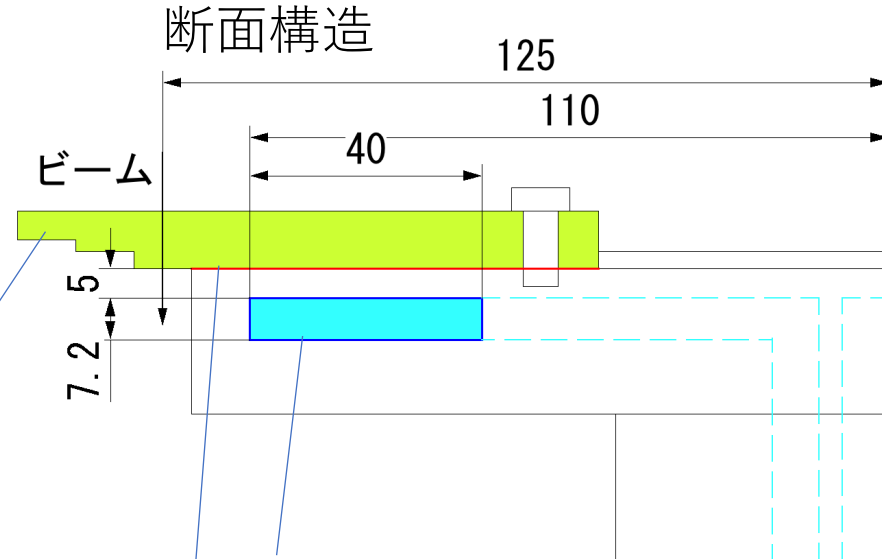
ターゲットではなく、ビーム（発熱源）を回す。

時間依存の伝熱計算

ビームスポット $\phi 1\text{mm}$ \rightarrow 1mm角で近似



ベリリウム：温度依存性を持った熱伝導率
表面からの輻射も考慮（輻射率 0.5）



水路熱伝達率: : $6 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$

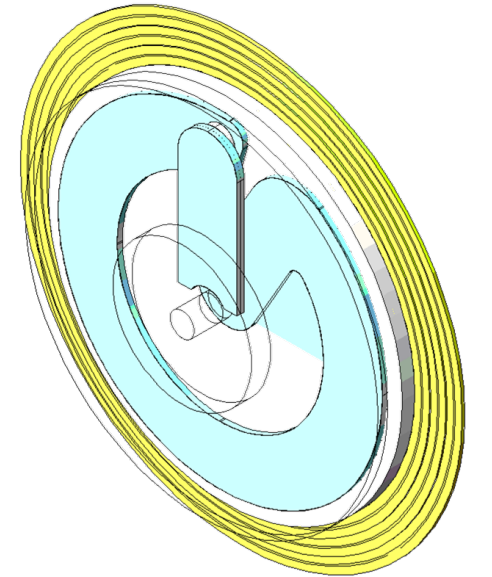
平滑管の熱伝達率の経験式より。

$V=1.5\text{m/s}$, $P=0.4\text{MPa}$, $T=24^\circ\text{C}$

接触熱伝達率: : $3 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$

経験式（橋の式）より。

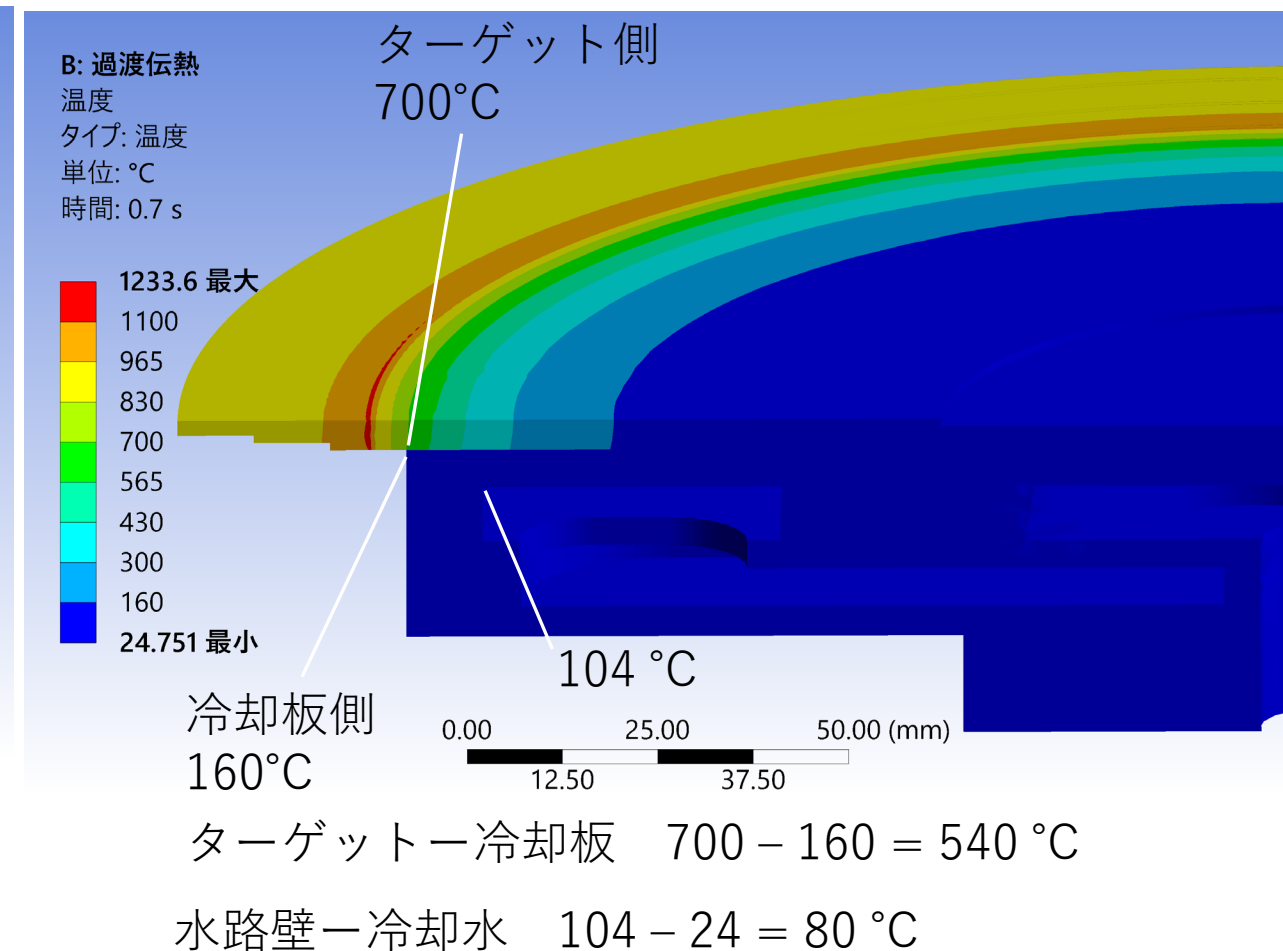
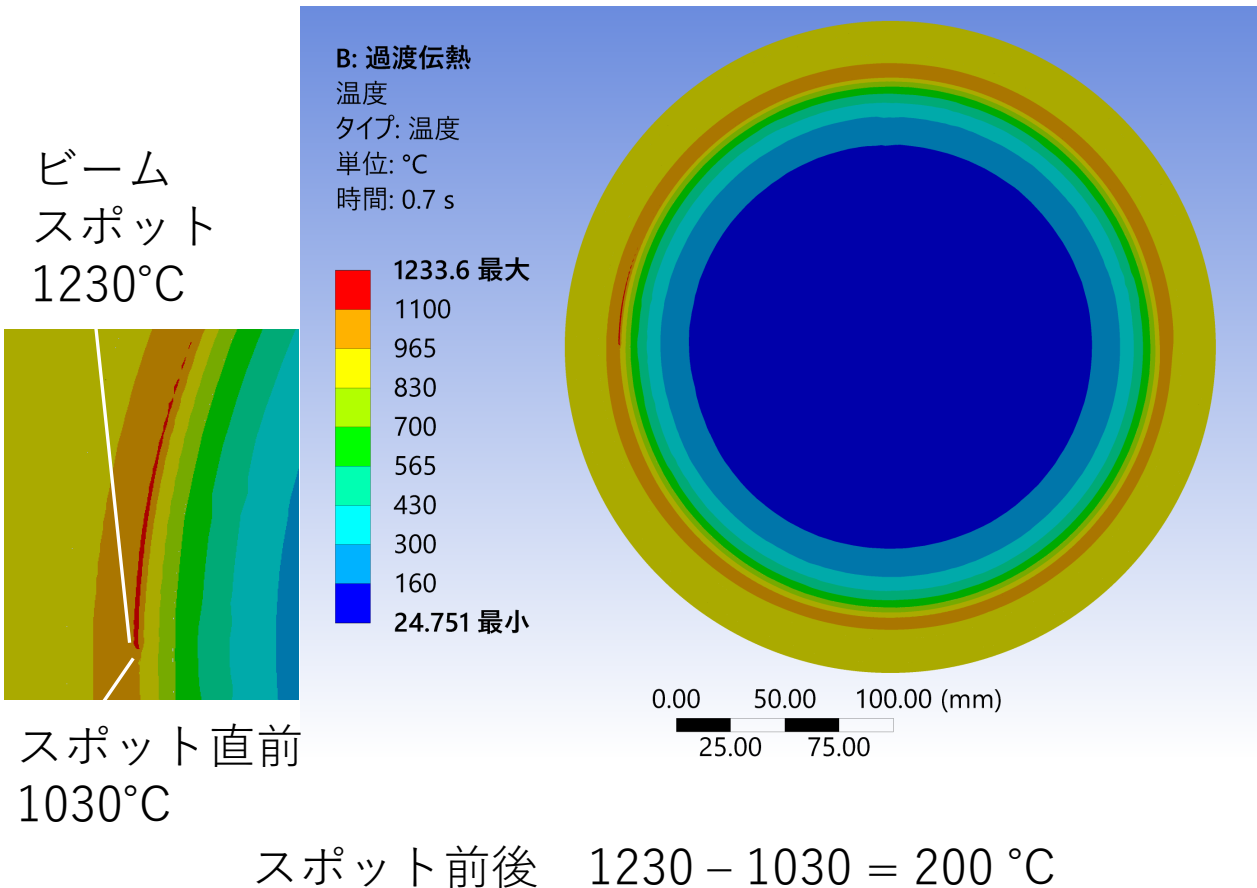
M6ネジ8本による締結圧から計算



水路構造

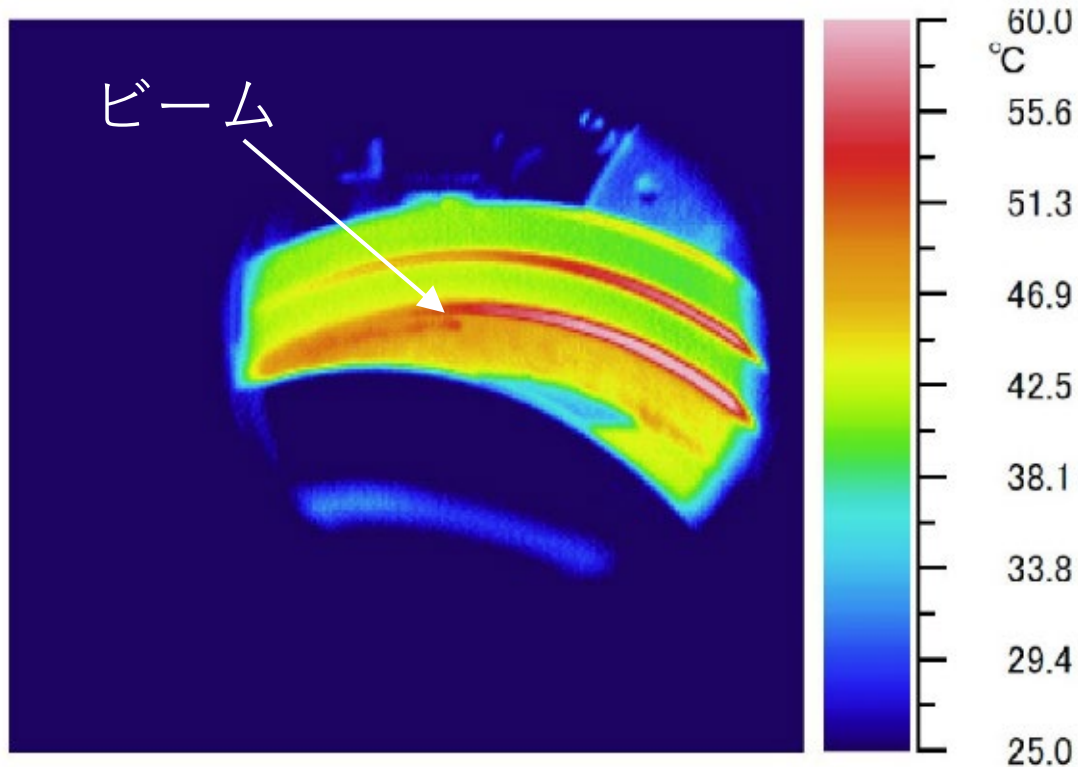
ANSYS計算結果

- ^{238}U 345MeV/u 1pμAを4mm厚さベリリウムに照射
入熱量 18kW, ターゲット回転数300rpm

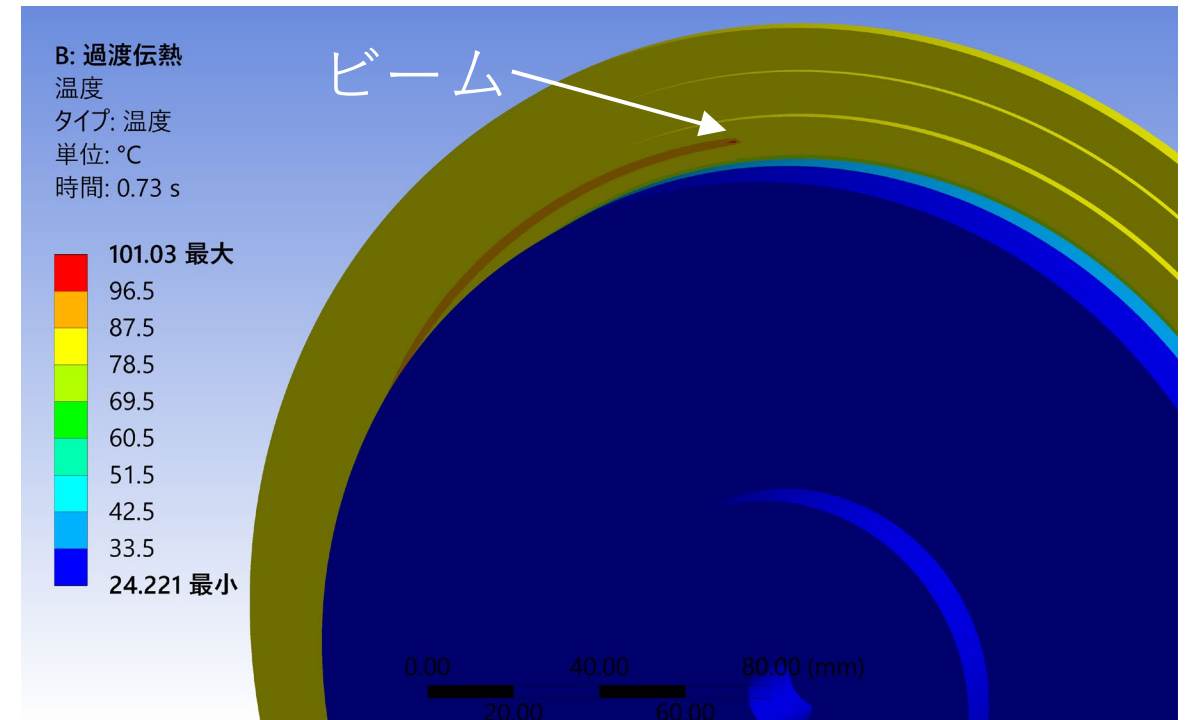


実測値との比較

- ^{78}Kr 345MeV/u 280pnAビームを Be 10mm、300rpmに照射



カメラ観測温度：48°C
輻射率、光路の減衰の補正: 106°C相当

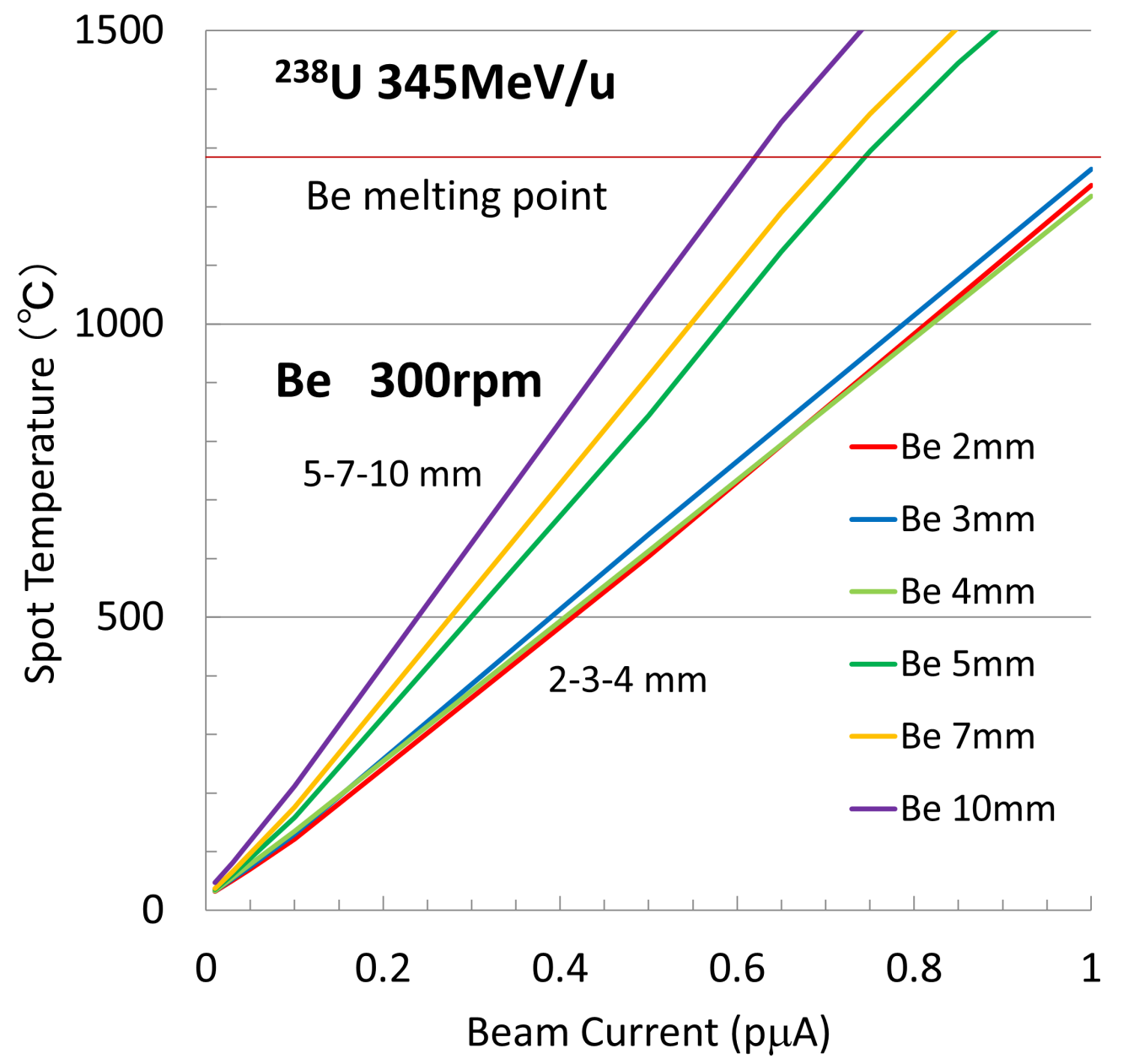


ビームスポット温度：101°C

ビームスポット温度は良く再現。 ⇒ 熱伝達率などのパラメータはおおむね妥当。

除熱能力評価

- 各種厚さのターゲットで、 ^{238}U 345 MeV/u 照射のビームスポット温度を計算。
 - 2-3-4 mmターゲットは融点を超えない。
 - 厚い5-7-10mmは600pAで融点こえる。
- 設計目標1pAを少し下回る。
 - 現在のRIBFのビーム強度目標 ^{238}U 300pA 他1pAには十分
 - 4mmを超える厚さは2つの回転ターゲットを重ねて使う。
- 現在のターゲットの改良点
 - 回転数を増やす。
300rpm→1000rpmで、スポット前後の温度差200°Cは1/3に。
 - ターゲットと冷却円盤の熱接触の改善
銀箔などを間に挟む。現状温度差540°Cと計算されているので、効果大



運用状況

- 回転ターゲットシステム2006年にBigRIPSとともに、完成。
当初はもっぱら固定ターゲットを使用。
- 2015年以降、SRCのビーム強度増加に伴って、回転ターゲットの使用が本格化。
- 2018年に1-2-3、4-6-8 mm厚さのベリリウムターゲットを追加整備。これによって、ベリリウム1~11mmまで1mmステップで選択可。⇒この組み合わせで ^{70}Zn , ^{78}Kr , ^{124}Xe , ^{238}U ビームに使用。
- これまでに使用した最大ビーム強度とその時のターゲットへの入熱量

^{48}Ca 500 pnA	2.1 kW
^{70}Zn 800 pnA	3 kW
^{78}Kr 600 pnA	2 kW
^{124}Xe 160 pnA	1.2 kW
^{238}U 100 pnA	2.1 kW
- これまで回転ターゲットに大きなトラブルなし。順調に使用。
(周辺機器 (真空ポンプなど。) にはいくつか故障発生。放射線ダメージ起源か。)

まとめ

- RIビームの生成・分離をBigRIPSを例に紹介。
 - 大口径のビームライン
 - 磁気剛性の分析2回、間にエネルギー減衰板をいれて、RI選択
- RIビーム生成用ターゲットの特徴を紹介。
 - ベリリウム、タングステン製
 - 厚さ容易に変えられる。
 - ビームによる発熱が大きいため、除熱が重要。
- BigRIPSの生成ターゲットに詳細構造を紹介。
 - ベリリウム製の水冷式回転ターゲット
 - 除熱能力 ^{238}U 1pμAに対応できるのは、厚さ4mmまで。
それ以上は、2台に分散。
 - ターゲット本体と冷却板の熱接触の改善を試みたい。

謝辞

- BigRIPSの回転ターゲットシステムは、2006年までに、理研の久保敏幸氏と、吉田敦氏によって、開発、建設されました。両名に深く感謝します。
- BigRIPSの回転ターゲットシステムは理研仁科センターの柳澤善行さんをはじめとするBigRIPSチームの皆さんで、運用、維持されています。皆さんの日々のご尽力に、深く感謝します。